

FILTROS ÓPTICOS DE SEGUNDO ORDEN CON UN SOLO

RESONADOR EN ANILLO

Salvador Vargas, Carmen Vázquez

Dpto. Tecnología Electrónica,

Área Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III, Av. Universidad 30,

Leganés 28911, Madrid, Spain • Fax: 3416249430 • E-mail: sevargas@ing.uc3m.es

Áreas de interés: Fibras ópticas: Tecnología de fibras y cables, dispositivos pasivos y activos, amplificadores

Palabras clave: resonadores, filtros ópticos

1 Introducción

En los últimos años los Resonadores en Anillo (RA) se han investigado intensamente por su uso en el dominio óptico en aplicaciones que van desde, filtros de frecuencia óptica para sistemas de multiplexación por longitud de onda (WDM, del inglés Wavelength División Multiplexing) [1], dispositivos Add/Drop [2], convertidores FSK a ASK [3], mux/demux, conmutación óptica [4], sensado óptico, filtros interleaver, láseres, etc. Estos dispositivos pueden constituir sistemas de orden mayor si se acoplan directamente [5], o se concatenan en serie.

En este artículo se presenta una forma de conseguir sistemas de segundo orden sin la necesidad de dos anillo en cascada o acoplados directamente. Y se hace una comparación entre dos estructuras de segundo orden realizadas con diferentes dispositivos.

2 Teoría

En la Figura 1 se muestra un RA genérico. Las funciones de transferencia en z de los mismos se pueden calcular a partir de las funciones de transferencia en frecuencia dadas en [6], sustituyendo en las mismas el término de fase $e^{j\omega L}$ por z^L . De modo que las funciones de transferencia, vienen dadas por:

$$\frac{A_3}{A_1}(z) = (1-\gamma)^{1/2} \left[\frac{\sqrt{1-K-Hz^{-1}}}{1-H\sqrt{1-K}z^{-1}} \right] \quad (1)$$

$$\frac{A_4}{A_1}(z) = \left[\frac{j(1-\gamma)^{1/2}\sqrt{K}}{1-H\sqrt{1-K}z^{-1}} \right] \quad (2)$$

A

donde K y γ son la constante de acoplo y el factor de pérdidas por exceso del acoplador H se define como:

$$H = (1-\gamma)^{1/2} e^{-aL} \prod_{i=1}^N Tx_i \quad (3)$$

con a el coeficiente de atenuación de amplitud, L la longitud del anillo, y Tx_i la i -ésima función de transferencia en solo transmisión del resonador.

Las funciones de transferencia ((1) - (2)), de los mismos se representan mediante razones de polinomios, lo que indica que su respuesta al impulso es infinita (IIR del inglés, Infinite Impulse Response) de manera similar a los filtros IIR de su contraparte digital.

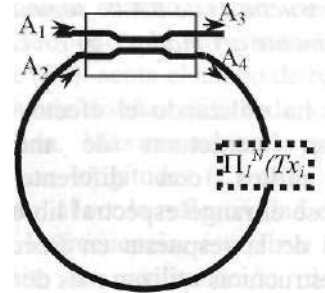


Figura 1: Resonador en Anillo Genérico.

Las funciones de transferencia de este dispositivo son de primer orden, por lo que el RA genérico, tiene sólo un polo.

Una función de transferencia en z de primer orden, describe el comportamiento del dispositivo, en cualquier instante discreto, a partir de los valores de las muestras de entrada en ese instante y de la de salida inmediatamente anterior a la cual se quiere saber su valor. En la ecuación (1), al tener un cero de primer orden, la salida también depende del valor de las muestras de entrada en el instante inmediatamente anterior. Debido a esto, un dispositivo fotónico con este tipo de respuesta, debe tener una salida realimentada hacia atrás, a través de un período unitario de retardo, r , siendo el anillo el que hace esta función de realimentación.

Por otro lado, un sistema de segundo orden, tiene una función de salida donde su denominador es un polinomio de segundo orden. Dependiendo su salida en un instante, de los valores de la salida en los dos instantes sucesivos anteriores. Para que un dispositivo fotónico tenga esta función debe tener por lo menos un camino de realimentación de la salida a través de un retardo del doble del

retardo unitario (2r), o dos lazos de realimentación de un retardo unitario (r).

Muchos RA de segundo orden se han realizado, concatenando dos etapas, ya sea directamente (paralelo, Figura 2.a) o colocando en cascada (serie, Figura 2.b) sistemas de primer orden.

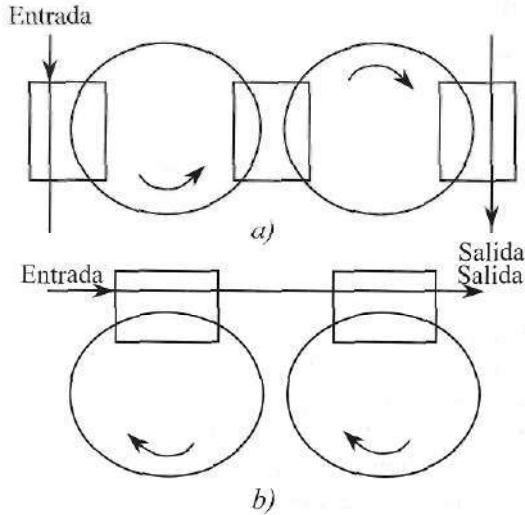


Figura 2: Estructuras de RA de segundo orden: a) Directamente acoplados, b) En cascada.

También se ha utilizado el efecto Vernier [3], para obtener estructuras de mayor orden, colocando anillos con diferentes retardos. Aumentándose el rango espectral libre, es decir la periodicidad de la respuesta en frecuencia. Pero todas estas estructuras utilizan más de un RA.

Sin embargo se puede demostrar que un solo RA con un elemento en transmisión-reflexión tiene una respuesta de segundo orden. Este elemento de transmisión-reflexión puede ser un interferómetro Michelson (IM) con redes de Bragg (RB) [7], un espejo de fibra (o interferómetro Sagnac) [8], o unas RB parcialmente reflectivas [9].

3 Diseño

La idea para el diseño de filtros de segundo orden con un solo RA, se basa en que un RA con reflexiones dentro del anillo, tendrá dos circulaciones de luz dentro, una hacia adelante y otra hacia atrás, por lo cual el mismo tiene dos lazos de realimentación, y por ello una función de segundo orden.

El dispositivo en cuestión se representa en la Figura 3. Donde FTR es la función transmisiva-reflexiva dentro del anillo, Tx_i y Ty_i , son cada una de las funciones en transmisión que se encuentran entre el acoplador de entrada y la FTR , o entre la FTR y el acoplador de entrada respectivamente.

Las funciones de transferencia en z son:

$$\frac{A_2}{A_1} = (1-\gamma)^{1/2}(1-K)^{1/2} \left[\frac{1 + Az^{-1} + Bz^{-2}}{(1 - Zp_1 z^{-1})(1 - Zp_2 z^{-1})} \right] \quad (4)$$

con A y B dadas por:

$$A = \frac{(1-\gamma)^{1/2}(K-2) \prod_{i=1}^N Tx_i \prod_{i=1}^M Ty_i \cdot FT}{(1-K)^{1/2}} \quad (5)$$

$$B = (1-\gamma) \prod_{i=1}^N Tx_i \prod_{i=1}^M Ty_i [FT^2 - FR^2] \quad (6)$$

Siendo FT y FR , las funciones en transmisión y reflexión respectivamente de la FTR .

Zp_1 y Zp_2 son los polos de las funciones de transferencia.

$$Zp_1 = (1-\gamma)^{1/2}(1-K)^{1/2} \prod_{i=1}^N Tx_i \prod_{i=1}^M Ty_i [FT + FR] \quad (7)$$

$$Zp_2 = (1-\gamma)^{1/2}(1-K)^{1/2} \prod_{i=1}^N Tx_i \prod_{i=1}^M Ty_i [FT - FR] \quad (8)$$

$$\frac{A_{4b}}{A_1} = \frac{j(1-\gamma)^{1/2} \sqrt{K} \left(\prod_{i=1}^N Tx_i \right)^2 FR \cdot z^{-1}}{(1 - Zp_1 z^{-1})(1 - Zp_2 z^{-1})} \quad (9)$$

A continuación se hará una comparación entre dos RA que utilizan diferentes funciones FTR para implementar las reflexiones dentro del anillo. Centrándose en el puerto A_4 en el sentido de recirculación hacia atrás, es decir A_{4b} .

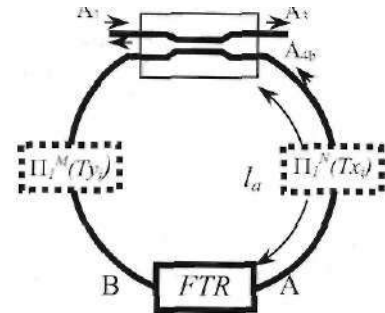


Figura 3: Resonador en Anillo de segundo orden con un solo anillo con reflexiones internas.

4 Interferómetro Michelson como Función Reflectora

Un interferómetro Michelson (IM) con RB se utiliza para realizar la primera función reflectora, véase la Figura 4, y se incluye una ganancia para compensar las pérdidas dentro del anillo, aunque no es necesaria si las mismas son despreciables.

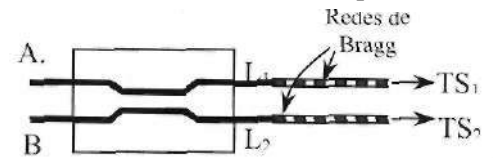


Figura 4: Interferómetro Michelson con RB.

Los polos del RA con esta función reflectora, $A41$, son complejos conjugados y su módulo y fase son:

$$|Zp| = (1-\gamma_2) \left[(1-\gamma)(1-K)G \right]^{1/2} r(\lambda) \quad (10)$$

$$\phi_p = \tan^{-1} \left[\frac{2\sqrt{K_2(1-K_2)}}{\pm(1-2K_2)} \right] + \theta_{BG}(\lambda) \quad (11)$$

donde γ_2 y K_2 son el factor de pérdidas por exceso y la constante de acoplo del acoplador del interferómetro Michelson, y $r(X)$ es la reflectividad de las RB.

Se puede demostrar que la mayor fase que pueden tener los polos de esta función viene dada por:

$$\max(\theta_p) \cong \frac{\pi}{2} \left[\frac{k_b}{\frac{n_{bef}}{n_{ef}L} + k_b} \right] \quad (12)$$

donde k_b es la constante de acoplo de las RB, n_{bef} y n_{ef} son los índices de refracción efectivo de las RB y de las guías respectivamente, y L la longitud del anillo incluyendo todos los retardos introducidos por las funciones Ty_j .

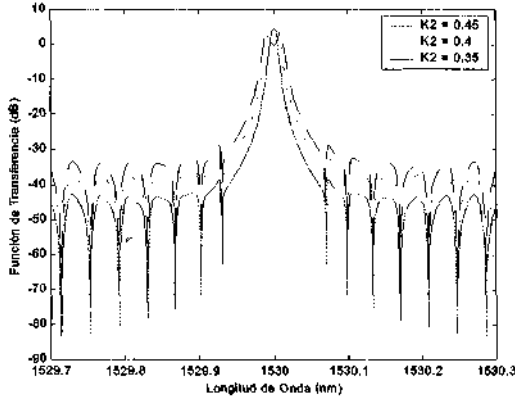


Figura 5: Función de transferencia para un RA con interferómetro Michelson

En la Figura 5 se muestra la función de transferencia del puerto A_4 con $G=1$, $K_j=0.1$, y variando la constante de acoplo K_2 desde 0.35 a 0.45, siendo la constante de acoplo de las RB de 225m^{-1} , con un ancho de banda de 2nm . La longitud del anillo es de 3.2mm ($\text{FSR}=0.5\text{nm}$ @ $1.53\mu\text{m}$). Con estos datos la máxima fase que se puede introducir en el anillo es de 0.6575 rad (37.67°) y se da para valores de K_2 de 0 ó 1. Como vemos el ancho de banda de la función de transferencia se puede aumentar a expensas de una disminución en el rechazo entre canales, reduciéndose de un valor de 50dB para $K_2=0.45$, a 35dB para un $K_2=0.35$. Y de un aumento del rizado en la misma de poco más de 4 dB .

Con la G lo que se busca es compensar las pérdidas que se dan en el anillo, y tener un grado de libertad más en la sintonización radial de los polos, ya que éstos también se pueden sintonizar por medio de K , y de esta manera el valor máximo de la función de transferencia, pudiendo ser G una ganancia o una pérdida.

En la Figura 6, se muestra una ampliación de la Figura 5, donde se ve que el punto máximo de la función de transferencia no cambia, ya que el módulo del polo es el mismo para los tres casos, pues en este rango de longitudes de onda el módulo de las RB es casi constante. También observando esta figura, se puede ver que se puede disminuir el rizado en el ancho de banda, si se

reflexiones internas, ajustando correctamente el valor de la posición radial de los polos, de cada una de las etapas.

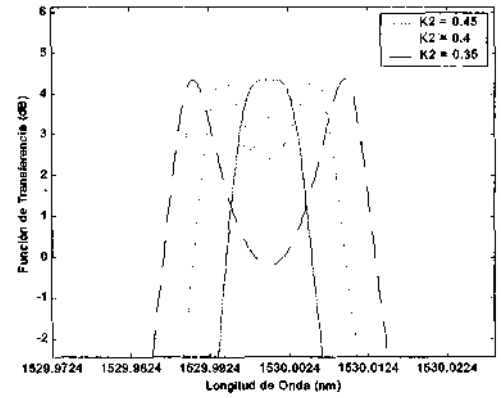


Figura 6: Ampliación de la Figura 5 en el ancho de banda del filtro.

Como vemos el ancho de banda máximo al que se puede aspirar al diseñar un filtro depende de la fase de los polos en frecuencia, siendo máximo el ancho de banda cuando la fase de los polos es máxima. De modo que la restricción de máxima fase posible (12), acota el ancho de banda máximo al que se puede diseñar utilizando varios RA con IM en cascada. Máxime sabiendo que se tiende a hacer RA con longitudes (L) cada vez menores. Por otro lado, al ser la reflectividad de las RB una función de la frecuencia, ésta sirve de tamiz que sólo permite la recirculación de ondas de frecuencia que se encuentren dentro de su ancho de banda, por lo que se rompería el FSR, olvidándonos de los canales adyacentes que podrían incorporarse si, se tratara de un RA sencillo.

5 Interferómetro Sagnac como Función Reflectora

Otra forma de implementar la función reflectora es utilizando un interferómetro Sagnac, como se puede apreciar en la Figura 7. Aquí, igualmente se introduce una $Ty_j = G^m$, siendo G una ganancia en potencia, de la misma manera que en el caso del interferómetro Michelson.

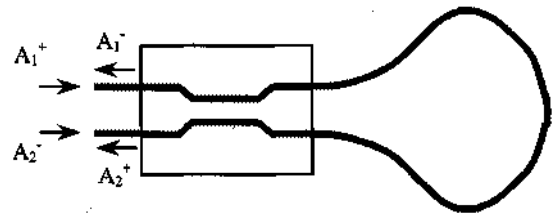


Figura 7: Interferómetro Sagnac.

Los polos del RA con esta función reflectora, A , son complejos conjugados y su módulo y su fase son:

$$|Zp| = (1 - \gamma_2) [(1 - \gamma)(1 - K)G]^{1/2} \quad (13)$$

$$\phi_s = \tan^{-1} \left[\frac{2\sqrt{K_2(1-K_2)}}{(1-2K_2)} \right] \quad (14)$$

El módulo de los polos de este dispositivo (13) es muy similar al módulo cuando se usa un IM como función transmisora-reflectora (10), excepto por la reflectividad de las RB, de modo que el valor de los polos no es una función de la frecuencia.

La fase de los mismos se puede variar desde 0 a $\pm K$. Siendo máxima cuando $K_2 \rightarrow 1$. Este rango de variación, indica que podemos colocar polos complejos conjugados dentro de todo el plano z .

En la Figura 8, se aprecia como al variar la fase de los polos mediante K_2 se tienen dos picos, uno por cada polo complejo conjugado, a distintas frecuencias. Los rechazos en este dispositivo son menores debido a la mayor separación entre los polos, disminuyendo el rechazo de 35 dB a 25 dB, a medida que K_2 aumenta entre 0.05 y 0.15 para valores de $K_1 = 0.1$.

Igualmente se puede ver que colocando varias etapas con estas características en cascada se puede formar un filtro con un rizado en la banda de paso menor, y un ancho de banda mucho mayor que el logrado cuando el dispositivo utilizado como FTR era un IM.

La ganancia se utiliza para compensar las pérdidas, e igualmente para la sintonización radial de los polos, aunque esta función también la puede hacer la constante de acoplo K .

Por ultimo, al atravesar la luz el mismo camino óptico, en ambas rotaciones el RA con interferómetro Sagnac es más estable y menos propenso a ser afectado por variables de influencia externas, tales como temperaturas, vibraciones, etc.

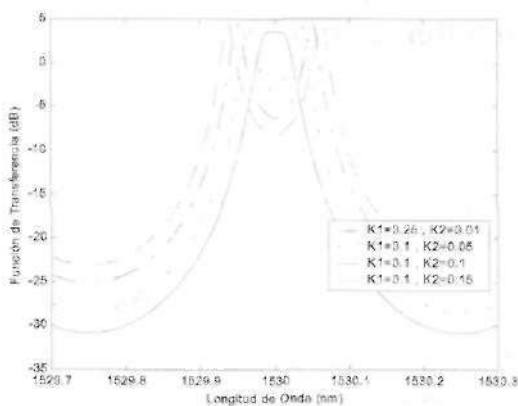


Figura 8: Función de transferencia para un RA con interferómetro Sagnac, con $G = 1$.

6 Conclusiones

En este artículo se ha presentado un dispositivo de segundo orden fotónico, con respuesta tipo IIR, con un solo RA, haciendo uso de funciones con circulaciones en ambas direcciones del anillo. Se

reflectivos un interferómetro Michelson y un interferómetro Sagnac. Encontrándose que el RA con interferómetro Michelson, tiene mejores rechazos entre canales, sin embargo presenta menores posibilidades para utilizarse en la síntesis de filtros fotónicos [10], debido a un menor rango angular de colocación de los polos del mismo. Por otro lado el RA con interferómetro Michelson permite romper la periodicidad de las RB, evitando así que la longitud del anillo sea un valor tan crítico, sin embargo presenta peores características de respuesta a variables de influencia externas.

7 Agradecimientos.

Este trabajo ha sido financiado por la Comunidad de Madrid (CAM-07T-0011-2001).

8 Bibliografía

- [1] B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus, J. Foresi, y J.-P. Laine, "Microring Resonator Channel Dropping Filters", Journal of Lightwave Technology, 10, (4), 998-1005, 1992.
- [2] Sai. T. Chu, Brent E. Little, Wugen Pan, Taro Kaneko, Shinya Sato, y Y. Kokobun, "An Eight-Channel Add-Drop Filter Using Vertically Coupled Microring Resonators, over a Cross Grid", IEEE Photonics Technology Letters, 11, (6), 691 - 693, 1999.
- [3] K. Oda, N. Takato, y H. Toba, "A Wide-FSR Wave guide Double-Ring Resonator for Optical FDM Transmission System", Journal of Lightwave Technol., 9, 728-736, 1991.
- [4] B. E. Little, H. A. Haus, J. S. Foresi, L. C. Kimerling, E. P. Ippen y D. J. Ripin, "Wavelength Switching and Routing Using Absorption and Resonance", IEEE Photonics Technology Letters, 10, (6), 816 - 818, 1998.
- [5] J. V. Hryniewicz, P. P. Absil, B. E. Little, R. A. Wilson, P.-T. Ho, "Higher Order Filter Response in Coupled Microring Resonators", Photon. Tech. Lett., 12, 320-322, 2000.
- [6] C. Vázquez, S. Vargas, J.M. Sánchez-Pena, "Router y demultiplexor basado en un resonador en anillo con amplificación y redes de Bragg", URSF99, Vol. II, 621-622, 1999.
- [7] S. Vargas, C. Vázquez, J. M. S. Pena, "Wide Tunable Filters Using a Recirculating Delay Line with Multi-reflections", Optical Engineering, 41, 926-928, 2002.
- [8] S. Vargas, C. Vázquez, J. M. S. Pena, "Novel Tunable optical filter employing a fiber loop mirror for synthesis applications in WDM", LEOS'01, 567-568, Nov. 2001.
- [9] S. Ch. Kim, S. B. Lee, S. S. Choi and B. Lee, "Recirculating fiber delay-line filter using a fiber Bragg Grating"; LEOS'98, Nov. 1998.
- [10] C. K. Madsen y J. H. Zao "Optical Filter Design and Analysis: A signal processing approach" John Wiley & Sons, 1999.